



УДК 662.76

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ НИЗКОКАЛОРИЙНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

NUMERICAL MODELLING OF EXPERIMENTAL COMBUSTION CHAMBER OF LOW-CALORIE GAS MIXTURE

Иванов Максим Валерьевич, магистрант каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: prokory.filippov@urfu.ru, Тел.: +7(982)712-29-17.

Филиппов Прокопий Степанович, аспирант каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: prokory.filippov@urfu.ru, Тел.: +7(982)712-29-17.

Левин Евгений Иосифович, к.т.н., доцент каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: prokory.filippov@urfu.ru, Тел.: +7(982)712-29-17.

Рыжков Александр Филиппович, д.т.н., профессор каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: prokory.filippov@urfu.ru, Тел.: +7(982)712-29-17

Аннотация. Приведено описание экспериментального стенда, предназначенного для изучения физико-химических характеристик процесса горения горючих газовых смесей, аналогичных по составу побочным продуктам металлургического производства (доменный газ, коксовый газ, ферросплавный газ, конвертерный газ). Проведено численное моделирование рабочего участка экспериментального стенда в CFD-пакете. Проведен анализ результатов численного моделирования.

Abstract. Description of experimental stand intended for investigation of physical and chemical characteristics of combustion process of the burning gas mixtures similar on composition to by-products of metallurgical production (blast furnace gas, coke oven gas, ferroalloy gas, converter gas) is provided. Numerical modeling of a working site of the experimental stand in a CFD is provided. The analysis of results of numerical modeling is provided.

Ключевые слова. Моделирование в CFD-пакете, сжигание доменного газа, экспериментальный стенд, утилизация доменного газа, диффузионный факел.

Key words. CFD modeling, blast furnace gas combustion, experimental stand, blast furnace gas utilization, diffusion flame.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с ужесточающимися требованиями экологической безопасности, в настоящее время по всему миру ведутся интенсивные научные исследования и проектно-конструкторские работы в направлении развития высокоэффективных теплоэнергетических установок на твердом топливе, безопасных для окружающей среды и климата [1]. В рамках данного направления проводятся разработки парогазовых установок с внутрицикловой газификацией твердого топлива (ПГУ-ВЦГ). Теплота сгорания синтез-газов, получаемых в результате газификации твердого топлива, меняется в широком диапазоне (4.2-13 МДж/нм³) [2].

В некоторых ПГУ-ВЦГ (Puertollano, Buggenum, Tampa Polk), в которых синтез-газ получают в результате кислородной газификации твердого топлива (низшая теплота сгорания – 9.67-11.12

МДж/нм³) [3], предусмотрено разбавление синтез-газа (до уровня низкокалорийного газа) или окислителя азотом, паром или продуктами сгорания, выполняемое для [4]:

1. подавления термических NO_x в КС ГТ за счет снижения теплоты сгорания разбавленного синтез-газа;
2. повышения мощности ГТУ, за счет увеличения массового расхода продуктов сгорания через газовую турбину;
3. повышения мощности паротурбинной части, благодаря повышению массовых расходов дымовых газов через котёл-утилизатор;
4. повышения КПД брутто станции.

При этом низшая теплота сгорания синтез-газа, в среднем, снижается до 4.5 МДж/нм³ [3].

Поэтому для разработки технологии сжигания низкокалорийного газа применительно к камере сгорания ПГУ необходимо изучить физико-

химические характеристики процесса горения низкокалорийного газа. Для этого в кафедре Тепловые электрические станции УрФУ на стадии изготовления находится экспериментальный стенд для изучения физико-химических характеристик процесса горения горючих газовых смесей, аналогичных по составу низкокалорийным промышленным синтез-газам («газы-аналоги»). В данной работе проведено численное моделирование рабочего участка экспериментального стенда с целью определения расчетных физико-химических характеристик процесса горения горючей газовой смеси, аналогичной по составу низкокалорийным промышленным синтез-газам.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

На рисунке 1 представлен эскиз экспериментального стенда.

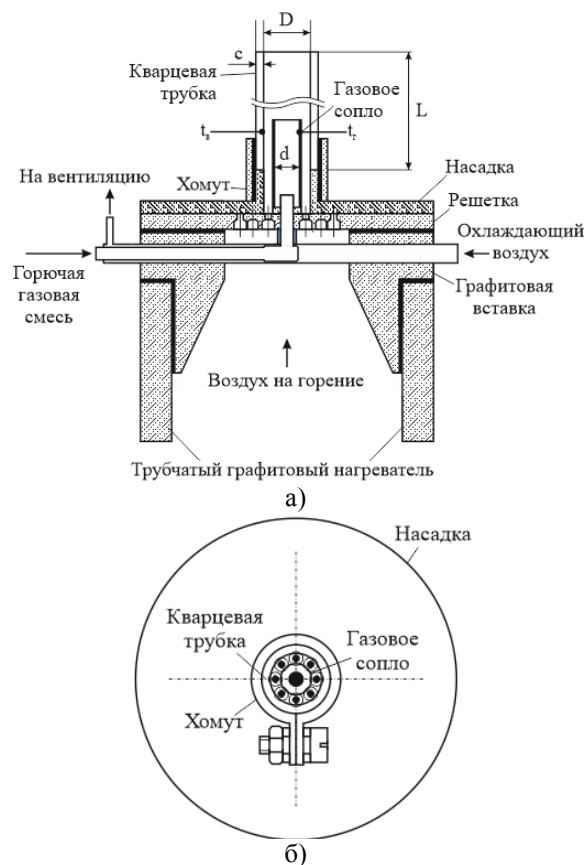


Рисунок 1 – Эскиз рабочего участка экспериментального стенда:
а) поперечный разрез; б) вид сверху.

Окислитель (воздух) газовой смеси нагревается до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ в трубчатом графитовом нагревателе. Поверх нагревателя крепится решетка, выполненная из нержавеющей стали, с 8 отверстиями для пропуска воздушного потока. Воздух на горение после нагревателя направляется в рабочий участок

экспериментального стенда. Решетка способствует выпрямлению и равномерному распределению воздушного потока в рабочем участке. Рабочий участок экспериментального стенда выполнена из кварцевой трубки с внутренним диаметром 15 мм и толщиной стенок 2.5 мм. Горючая газовая смесь с температурой $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ подается в рабочий участок через газовое сопло с внутренним диаметром 8 мм и толщиной стенок 0.5 мм. Длина рабочего участка (L) меняется в зависимости от расхода подаваемых сред.

Экспериментальный стенд предназначен для исследования физико-химических характеристик ламинарного диффузионного факела. В зависимости от условий эксперимента температуры и расходы подаваемых сред варьируются в широком диапазоне. Температуры газовой смеси и воздуха измеряются микротермопарами t_r и t_b соответственно (рисунок 1а). Расходы подаваемых сред измеряются ротаметрами и регуляторами расхода газа (РРГ). Схема экспериментального стенда представлена на рисунке 2.

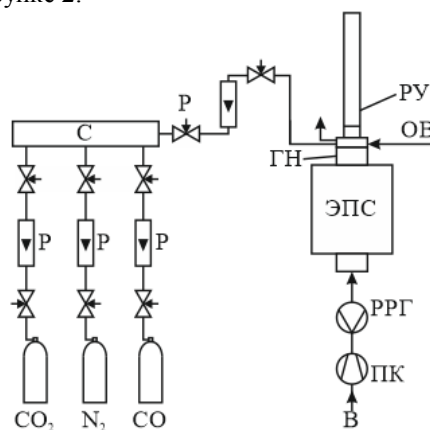


Рисунок 2. Схема экспериментального стенда:
С – смеситель; Р – ротаметр; РУ – рабочий участок; ОВ – охлаждающий воздух; ГН – графитовый нагреватель; ЭПС – электрическая печь сопротивления; РРГ – регулятор расхода газа; ПК – поршневой компрессор; В – воздух на горение горючей газовой смеси.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

На данный момент, ведущими разработчиками технологий сжигания низкокалорийных синтез-газов в камере сгорания парогазовой установки являются концерны Siemens, General Electric и Mitsubishi Hitachi Power Systems (до 2014 года известный как Mitsubishi Heavy Industries). У концерна Mitsubishi Hitachi Power Systems больше опыта, в отличие от концернов Siemens и General Electric, по внедрению технологии сжигания низкокалорийных газов (таких как доменный или коксо-доменный газ) в камере сгорания парогазовой установки. Поэтому в данной работе представлено моделирование процесса горения

газовой смеси аналогичного по составу доменному газу.

Численное моделирование экспериментального стенда проводилось в CFD-пакете. На рисунке 1б показано, что рабочий участок экспериментального стенда имеет осесимметричную форму. Поэтому, для сокращения длительности расчёта, модель можно разделить на восемь сегментов (в решетке 8 отверстий для пропуска воздуха) и провести численное моделирование только одного сегмента. Благодаря симметрии и ламинарному режиму течения сред в остальных сегментах характер протекания процесса горения будет аналогичным. Такой способ моделирования способствует не только сокращению длительности расчёта численной модели, но и значительно упрощает геометрическую форму модели. Параметры горючей газовой смеси (ГГС) и окислителя (воздуха) в входном сечении рабочего участка приведены в таблице 1. В ходе моделирования длина рабочего участка (L) принята равным 100 мм.

Таблица 1 – Входные параметры горючей газовой смеси и окислителя (воздуха)

Среда		ГГС	Воздух
Состав, масс. %	CO	21	0
	CO ₂	28	0
	N ₂	51	76
	O ₂	0	23
	H ₂ O	0	1
Температура, °C		30	800
Расход, 10 ⁷ м ³ /с	Случай 1	2.15	1.55
	Случай 2	4.31	3.09

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В таблице 2 приведены расчетные характеристики продуктов сгорания в выходном сечении рабочего участка при горении газовой смеси, аналогичной по составу доменному газу.

Таблица 2 – Расчетные характеристики продуктов сгорания на выходном сечении рабочего участка

№	Случай 1	Случай 2
Среднемассовая температура*, К	368.06	587.57
Состав, масс. %	O ₂	1.98
	N ₂	60.97
	H ₂ O	0.4
	CO ₂	36.55
Скорость, см/с	2.12	7

* В ходе моделирования теплоизоляция рабочего участка не учитывалась («не закрытая» кварцевая трубка, см. рисунок 1а).

На рисунке 2 представлены профили распределения массовой доли CO и температуры в продольном сечении рабочего участка экспериментального стенда, полученные в результате численного моделирования.

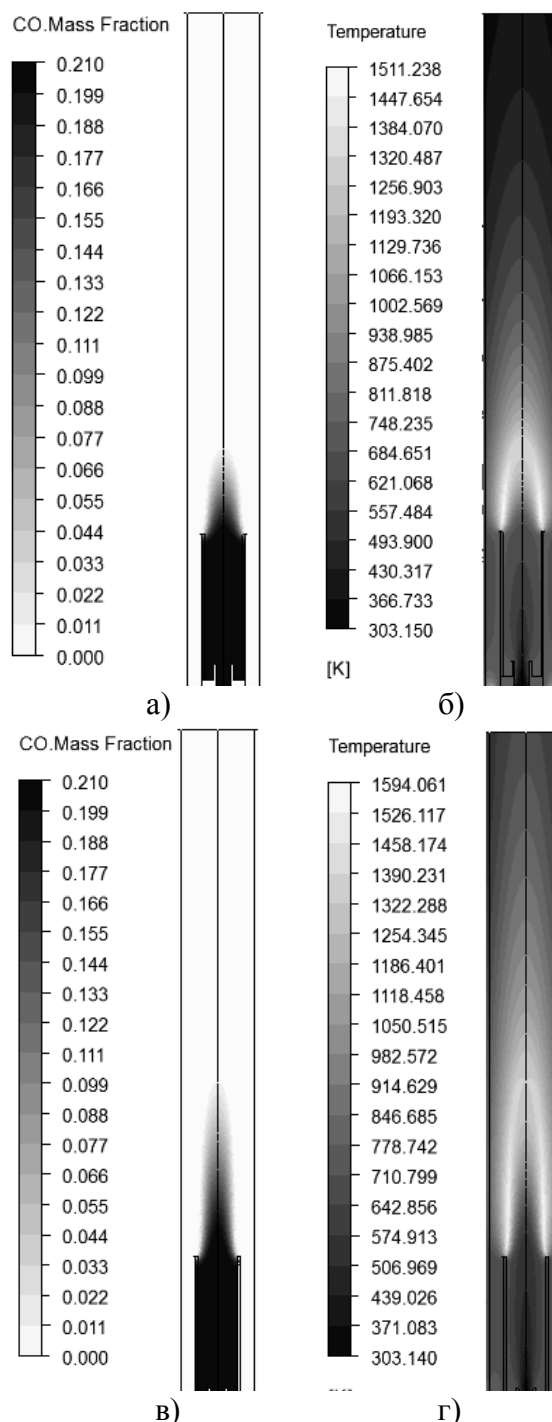


Рисунок 2 – Профили распределения массовой CO и температуры в продольном сечении рабочего участка: а), б) – для Случая 1; в), г) – для Случая 2.

Результаты моделирования показали, что длина факела в первом случае составляет 17 мм, во втором случае – 34 мм. Расчетная концентрация CO в выходном сечении для обоих случаев составляет порядка 54 ppm, что свидетельствует о достаточной полноте сгорания CO в лабораторных условиях.

Численное моделирование показало, что в первом случае расчетная максимальная температура факела в рабочем участке составляет 1511.24 К, расчетная средняя температура внутренних стенок кварцевой трубки составляет 610.22 К (при условии, что температура окружающего воздуха составляет 293.15 К).

Во втором случае расчетная максимальная температура факела в рабочем участке составляет 1594.06 К, расчетная средняя температура внутренних стенок кварцевой трубки составляет 690.52 К (при условии, что температура окружающего воздуха составляет 293.15 К).

На рисунке 3 представлены расчетные профили распределения массовой доли СО и температуры в продольном сечении рабочего участка для Случая 1 в «закрытой» (теплоизолированной) кварцевой трубке.

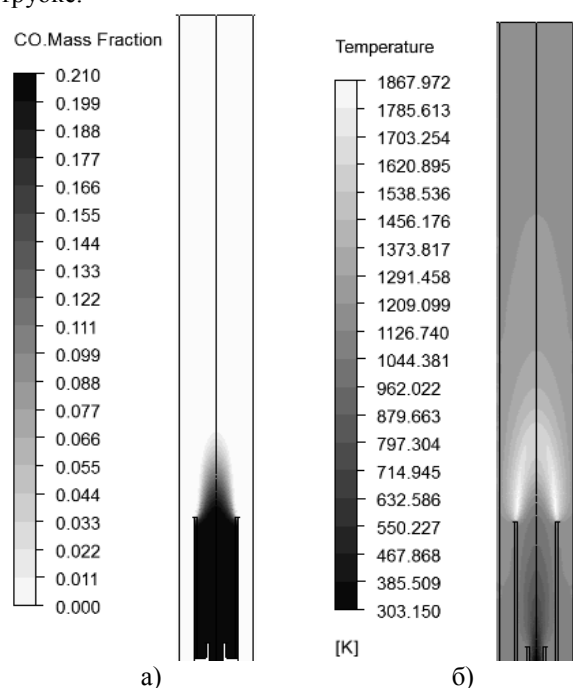


Рисунок 3 – Профили распределения массовой СО и температуры в продольном сечении рабочего участка для Случая 1.

Результаты моделирования показали, что длина факела в «закрытой» трубке составляет 17 мм, расчетная максимальная температура факела в рабочем участке составляет 1867.97 К, расчетная средняя температура внутренних стенок кварцевой трубки составляет 1179.37 К (при условии, что температура окружающего воздуха составляет 293.15 К). Расчетная концентрация СО в выходном сечении составляет порядка 54 ppm, что свидетельствует о достаточной полноте сгорания СО в лабораторных условиях.

ВЫВОД

Расчетная длина факела для «не закрытой» кварцевой трубки в первом случае составляет 17 мм, во втором случае – 34 мм. Для Расчетная

длина факела «закрытой» кварцевой трубки в первом случае составляет 17 мм. Расчетная концентрация СО в выходном сечении во всех случаях составляет порядка 54 ppm.

Во всех случаях расчетная температура стенок кварцевой трубки ниже температур деформации и размягчения кварцевого стекла [5, 6]. Это означает, что рабочий участок экспериментального стенда может быть выполнен из любой марки кварцевого стекла.

Из рисунка 2 видно, что воздух в промежутке между входным сечением рабочего участка и зоной смешения с газовой смесью охлаждается в обоих случаях приблизительно на 400 К. Такое охлаждение обусловлено отсутствием теплоизоляции рабочего участка («не закрытая» кварцевая трубка).

Из рисунка 3 видно, что воздух в «закрытой» кварцевой трубке в промежутке между входным сечением рабочего участка и зоной смешения с газовой смесью нагревается приблизительно на 100 К.

В дальнейшем планируется исследование влияний изменений температур и расходов подаваемых сред на физико-химические характеристики диффузионного факела в вышеописанном экспериментальном стенде.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00479 мол. а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прогноз научно-технологического развития России: 2030 [Электронный ресурс]. URL: https://prognoz2030.hse.ru/data/2014/12/25/1103939133/Prognoz_2030_final.pdf (дата обращения: 04.05.16).
2. Hasegawa T. Developments of gas turbine combustors for air-blown and oxygen-blown IGCC [Электронный ресурс]. URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs/22903/InTech-Developments_of_gas_turbine_combustors_for_air_blown_and_oxygen_blown_igcc.pdf (дата обращения: 04.05.16)
3. Ryzhkov A.F., Levin E.I., Filippov P.S. Use of poor industrial gases for power generation in the combined cycle // Metallurgical and Mining Industry. 2015. №6. P.629-641.
4. Кудинов А. А., Горланов С. П. Влияние впрыска водяного пара в камеру сгорания газотурбинной установки на эффективность работы котла-утилизатора // Промышленная энергетика. – М., 2014. - № 12. - С. 32-35.1.
5. ГОСТ 15177-70. Трубы из прозрачного кварцевого стекла для источников света и электровакуумных приборов. М. 1970.
6. ГОСТ 15130-86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия. М. 1999.